

# ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ ГАФНИЕМ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И МОДУЛЬ УПРУГОСТИ СПЛАВА IMP-BAZALM

*Гриб С.В., Илларионов А.Г., Марковский П.Е. \*, Скиба И.А. \**

*Руководители: проф. докт. техн. наук Попов А.А., академик НАН Украины  
Ивасишин О.М. \**

УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
г. Екатеринбург

\*Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова, НАН Украины, г. Киев  
e-mail: illarionovag@mail.ru

Сплав IMP-BAZALM (Zr-31Ti-18Nb (ат.%)), разработанный в ИМФ НАНУ является перспективным сплавом медицинского назначения. Система легирования данного сплава подобрана таким образом, чтобы материал не был токсичным и обеспечивал хорошую механическую совместимость с биотканями, а именно характеризовался низким модулем упругости и большой степенью обратимой деформации [1]. С точки зрения рентгенодиагностики, биоматериалы должны также характеризоваться высоким коэффициентом поглощения рентгеновских лучей, что позволит, значительно сократить время экспозиции и улучшить качество (контрастность) изображений, позволяющих изучать процессы взаимодействия биоткани с имплантатом. Т.к. величина поглощения рентгеновских лучей зависит от атомного номера  $Z$  химического элемента, то исходя из химического состава, сплав IMP-BAZALM ( $Z_{\text{Zr}} = 40$ ,  $Z_{\text{Ti}} = 22$ ,  $Z_{\text{Nb}} = 41$ ) должен обладать большим коэффициентом поглощения по сравнению с костной тканью, которая состоит из фосфата кальция ( $Z = 20$  для кальция и  $Z = 15$  для фосфора). Тем не менее, изображения, получаемые методами рентгенодиагностики, характеризовались неудовлетворительной контрастностью. В связи с этим, сплав IMP-BAZALM легировали нетоксичным, характеризующимся высокой растворимостью в твердых растворах на основе циркония и более тяжелым элементом гафнием ( $Z = 72$ ) в количестве 2, 4, 6, 8, 10 ат. %. Целью работы явилось изучить влияние легирования гафнием на фазовый состав, а главное, модуль упругости сплава IMP-BAZALM, т.к. легирование не должно приводить к существенному повышению этой характеристики. Сплавы с различным содержанием гафния были подвергнуты многоступенчатой обработке - вначале горячей деформации прокаткой, затем отжигу в  $\beta$ -области и последующей холодной деформации волочением.

Согласно данным рентгеноструктурного фазового анализа (РСФА), легирование гафнием сплава BAZALM понижает стабильность  $\beta$ -твердого раствора по отношению к  $\beta \rightarrow \omega$ -,  $\beta \rightarrow \alpha''/\alpha'$ - превращениям (рисунок 1). Так, введение 2-8 ат. % Hf способствует формированию трехфазного  $\beta + \alpha'' + \omega$  состояния, а 10 ат. % Hf – четырехфазного  $\beta + \omega + \alpha'' + \alpha'$ .

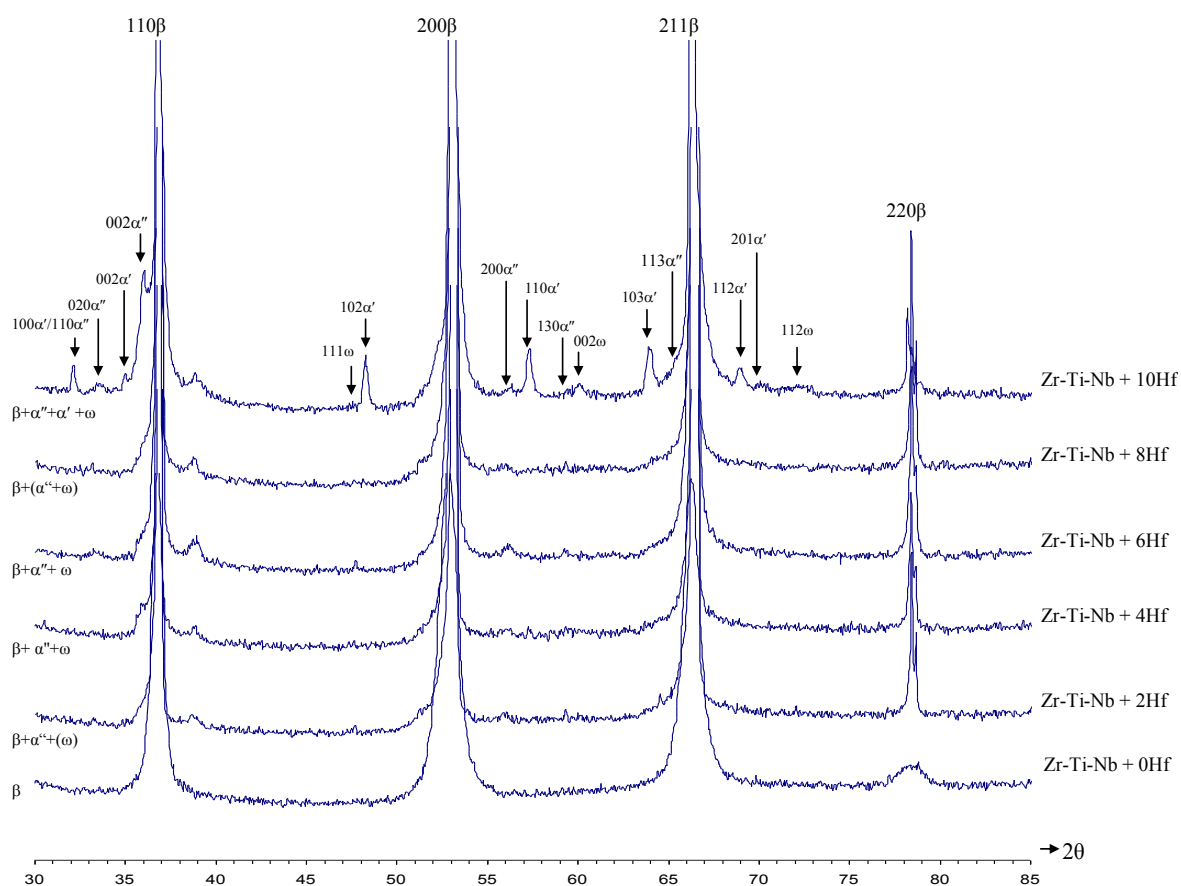


Рисунок 1 Данные РСФА сплава IMP-BAZALM с различным содержанием гафния

Следует отметить, что в сплаве с 2 ат. % Hf значение периода решетки  $\beta$ -твердого раствора (0,34485 нм) меньше, чем в тройном сплаве (0,34614 нм), но заметного изменения в значении периода решетки  $\beta$ -фазы при увеличении содержания гафния в сплаве с 2-х до 8 ат. % Hf не наблюдалось, по-видимому, вследствие малой объемной доли вторых фаз ( $\omega$ ,  $\alpha''$ ) и близости атомных размеров циркония и гафния. В сплаве с 10 ат. % Hf наблюдается максимальная объемная доля вторых фаз ( $\omega$ ,  $\alpha''$ ,  $\alpha'$ ) (рисунок 1), при этом, период  $\beta$ -фазы повысился от 0,34485 до 0,34587 нм по сравнению с остальными сплавами с гафнием. На наш взгляд, это связано с тем, что все образующиеся фазы ( $\omega$ ,  $\alpha''$ ,  $\alpha'$ ) должны иметь более высокое содержание титана, чем  $\beta$ -твердый раствор. Т.е. непревратившийся  $\beta$ -твердый раствор обедняется по титану, который имеет наименьший атомный радиус среди всех легирующих элементов, что и способствует росту периода  $\beta$ -фазы. Периоды решеток  $\alpha''$ ,  $\omega$ ,  $\alpha'$  фаз составили:  $a_{\omega} = 0,487$  нм,  $c_{\omega} = 0,3076$  нм;  $a_{\alpha''} = 0,328$  нм,  $b_{\alpha''} = 0,5311$  нм,  $c_{\alpha''} = 0,4989$  нм;  $a_{\alpha'} = 0,3214$  нм,  $c_{\alpha'} = 0,5111$  нм. Данные по периодам кристаллических решеток фаз сопоставимы с приводимыми в литературе [2] для сплавов на основе циркония.

Результаты измерения модуля нормальной упругости методом динамического механического анализа (ДМА) показали (рисунок 2), что

выделение вторых фаз, в общем, способствует повышению модуля упругости от 68,6 ГПа – в сплаве без гафния со структурой  $\beta$ -фазы до 73,5 ГПа – в сплаве с 10 ат. % Hf с многофазной  $\beta$ ,  $\omega$ ,  $\alpha''$ ,  $\alpha'$  структурой. Некоторое снижение модулей при 2 и 8 ат. % Hf соответствует сплавам с минимальной интенсивностью линий вторых фаз на дифрактограммах (рисунок 1).

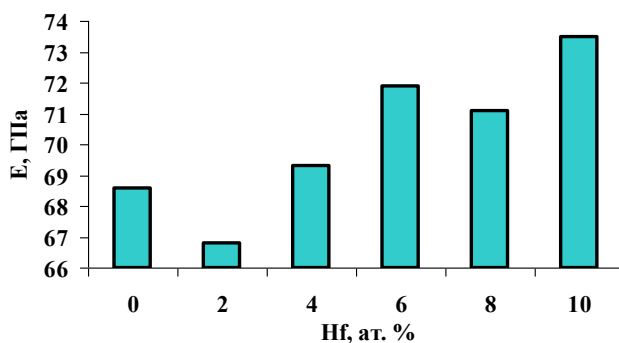


Рисунок 2 Изменение модуля упругости сплава IMP-BAZALM в зависимости от содержания гафния

Можно заключить, что легирование сплава IMP-BAZALM гафнием способствует формированию многофазного состояния ( $\beta+\alpha''+\omega$ ) – при содержании гафния в концентрационном интервале (2...8) ат. % и ( $\beta+\alpha''+\alpha'+\omega$ ) – при 10 ат. %, что, в свою очередь, способствует повышению модуля упругости от 68,6 ГПа – в сплаве без гафния со структурой  $\beta$ -фазы до 73,5 ГПа – в сплаве с 10 ат.% Hf.

Таким образом, для того, чтобы упростить процедуру рентгенодиагностики увеличив поглощающую способность материала, допустимо легирование сплава IMP-BAZALM гафнием до 4 ат. %, т.к. именно в этом концентрационном интервале не наблюдается значительного роста модуля упругости сплава.

1. *Ивасишин О.М., Карасевская О.П., Мордюк Б.Н. и др.* Создание низкомоульных  $\beta$ -сплавов на основе системы цирконий-титан с высокой обратимой деформацией // 49-я Международная конференция «Актуальные проблемы прочности»: сборник тезисов. Киев, 2010. С. 98.

2. *Добромыслов А.В., Талуц Н.И.* Структура циркония и его сплавов. Екатеринбург: УрО РАН, 1997. 227 с.

---

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ-Укр\_а №10-08-90413 и при поддержке гранта УрФУ